

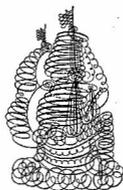
Prof. Dott. Ing. GIUSEPPE PAZIENZA

Libero Docente di ELETTOACUSTICA presso l'UNIVERSITÀ di PISA
Docente di LOCALIZZAZIONE SOTTOMARINA presso l'ACCADEMIA NAVALE di LIVORNO

Direttore dell'Ufficio Studi di Elettroacustica USEA, San Terenzo (La Spezia)
delle Società NUOVA SAN GIORGIO e OFFICINE GALILEO

FONDAMENTI DELLA LOCALIZZAZIONE SOTTOMARINA

*A ricordo del Prof.
Giuseppe Pazienza
indimenticabile
direttore dell'USEA
Eusebio*



STUDIO GRAFICO RESTANI - LA SPEZIA
1970

CAPITOLO XV

LA RIVERBERAZIONE

Introduzione.

Se un'onda acustica, che si propaga in mare, incide sulla superficie o sul fondo, una parte della sua energia viene riflessa talvolta prevalentemente in direzione speculare talvolta, più o meno uniformemente, in tutto lo spazio sottomarino circostante. Fenomeni di diffusione dell'energia acustica si verificano anche nel volume d'acqua interessato dalla propagazione a causa di variazioni locali della densità e della velocità del suono, e quindi della resistenza acustica del mezzo stesso. Sono infatti causa di riflessione e di diffusione le discontinuità termiche, le correnti, i moti convettivi che, come si è visto nel precedente capitolo XIV, si instaurano con alcune distribuzioni batitermiche e, soprattutto, la moltitudine innumerevole di microorganismi che più o meno densamente occupano lo spazio subacqueo. Gli anzidetti fenomeni di riflessione, quando non obbediscono alla legge della riflessione speculare, ma l'energia incidente viene più o meno uniformemente diffusa nello spazio circostante, sono più propriamente denominati *riverberazione*. Tre diversi tipi di riverberazione si possono quindi riscontrare in mare: la *riverberazione di volume*, la *riverberazione di fondo* e la *riverberazione di superficie*.

I fenomeni di riverberazione determinati dalla propagazione di un impulso di energia acustica hanno grande importanza nella localizzazione subacquea attiva: i segnali d'eco, che gli impianti ecogniometrici devono rivelare, sono infatti sovente mascherati non dal rumore ambientale marino, o dal rumore interno dei serbatoi sui quali gli impianti sono installati, ma proprio dalla riverberazione di volume, di superficie e fondo generata dall'impulso irradiato dagli impianti stessi. E' in vista di ciò che si è ritenuto opportuno effettuare nel presente capitolo uno studio dei fenomeni di riverberazione derivanti dalla emissione di un impulso di energia acustica di breve durata: verranno così determinati i modi coi quali, sia pure subordinatamente a talune ipotesi semplificative, l'intensità dell'onda di riverberazione varia in funzione del tempo e dei parametri strutturali e funzionali degli impianti ecogniometrici e i valori di quelle costanti che carat

terizzano le proprietà riverberanti del volume d'acqua, della superficie e del fondo. Sarà anche considerata la dipendenza delle costanti ora dette dalla frequenza e dall'angolo di radenza dell'onda incidente, dalle condizioni del mare, dalla costituzione e dalle caratteristiche morfologiche del fondo.

1. La riverberazione di volume.

Una valutazione della intensità della riverberazione di volume, in funzione del tempo e delle caratteristiche strutturali e funzionali dell'impianto ecogniometrico, può essere effettuata supponendo che nello spazio sottomarino sia distribuito uniformemente ma con legge casuale un numero infinito di riflettori elementari; le proprietà riverberanti del mezzo possono essere allora commisurate ad una costante m il cui valore è fornito dal rapporto tra la potenza riflessa da un elemento di volume unitario e la intensità dell'onda incidente nel centro dell'elemento medesimo; se si denota con dW la potenza riflessa da un elemento di volume dV e con I l'intensità del raggio incidente risulta quindi:

dW = m · I · dV 15-1

La costante m ora definita ha evidentemente le dimensioni dell'inverso di una lunghezza e si misura generalmente in m⁻¹ o Yd⁻¹.

Se si suppone, come è ragionevole, che la potenza riflessa dW di cui alla 15-1 sia uniformemente distribuita nello spazio che circonda l'elemento di volume dV, la intensità acustica dI_r dell'onda di riverberazione, a distanza unitaria dall'elemento dV, risulta evidentemente:

dI_r = dW / 4π = mI / 4π dV 15-2

Dalla 15-2 si deduce che le proprietà riverberanti del mezzo possono essere commisurate anche al valore di una costante che esprime il rapporto tra la intensità acustica dell'onda riflessa dalla unità di volume del mezzo all'unità di distanza da esso, e la intensità dell'onda incidente nel centro del volume unitario considerato; tale costante è evidentemente m / 4π ed il suo valore, espresso

in dB, è detto *indice di riverberazione di volume (volume riverberation strenght)*.

In base a quanto anzidetto, il calcolo della intensità dell'onda di riverberazione di volume, prodotta da un impulso ecogniometrico e ricevuta dallo stesso impianto in un generico istante, può essere effettuato sommando le intensità acustiche elementari delle onde riflesse da tutti gli elementi compresi entro il volume coagente ai fini della riverberazione. Il volume coagente relativo ad un certo istante è evidentemente il volume che contiene tutti gli elementi le cui potenze riflesse contribuiscono a determinare la intensità della riverberazione ricevuta in quello stesso istante. Se si denota allora con τ la durata dell'impulso e con c la velocità di propagazione, il volume coagente relativo ad un generico istante può essere definito come il luogo geometrico dei punti dello spazio contemporaneamente interessati dalla propagazione e le cui distanze dal trasduttore differiscano in quello istante non più che cτ / 2. Nel caso in esame, se si misura il tempo a

partire dall'istante di inizio dell'impulso, il volume coagente relativo ad un generico istante t è quello compreso tra le sfere di raggi R = ct / 2 e R + cτ / 2 = c(t + τ) / 2.

Sia allora un trasduttore ecogniometrico di guadagno di trasmissione G_t, che irradia durante l'impulso una potenza acustica W_o, posto, come in fig. 15-1, nell'origine O di un sistema cartesiano ortogonale di riferimento x, y, z.

Per valutare l'intensità dell'onda di riverberazione ricevuta dal trasduttore in un certo istante t, si prenda in considerazione un generico elemento di volume dV delimitato dalle superfici sferiche di raggi R = ct / 2 e R + dR, dai due piani meridiani di coordinate β e β + dβ e dai due piani paralleli di coordinate α e α + dα.

La intensità acustica incidente sull'elemento di volume ora definito, in base alla 14-84a ed alla definizione stessa di guadagno di direttività in trasmissione, è evidentemente:

I = G_t W_o / 4π · 1 / R² · 10^{-a} / 10¹⁰ · φ_t²(α, β) 15-3

essendo φ_t(α, β) la caratteristica di direttività normalizzata all'unità del trasduttore in esame, supposto orientato in modo che sia φ_t(0, 0) = 1.

Dalla figura 15-1 si potrà facilmente verificare che l'elemento di volume dV è d'altra parte:

$$dV = R^2 \cos \alpha \, d\alpha \, d\beta \, dR \quad 15-4$$

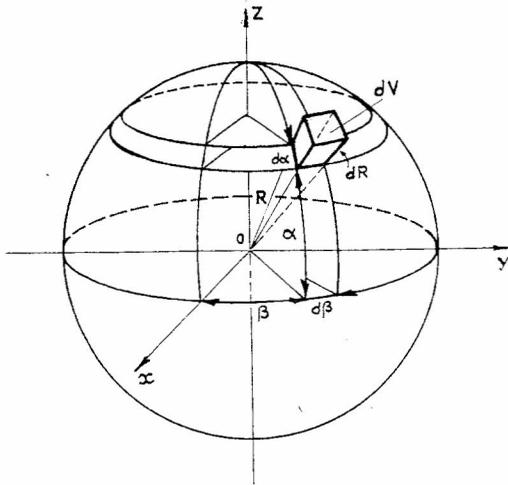


FIG. 15.1 - ELEMENTO DI VOLUME RIVERBERANTE dV .

L'intensità acustica elementare dell'onda riflessa dall'elemento dV , valutata nel punto O di ubicazione del trasduttore, in base alla 15-2, è quindi:

$$dI_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^4} 10^{-\frac{2\alpha}{10}R} \varphi_r^2(\alpha, \beta) \frac{m}{4\pi} R^2 \cos \alpha \, d\alpha \, d\beta \, dR \quad 15-5$$

Giova per il seguito commisurare la intensità della riverberazione alla intensità acustica di un'onda piana che, provenendo dalla direzione $\alpha = \beta = 0$, provoca sul trasduttore considerato lo stesso effetto della riverberazione. L'onda piana, così come ora definita, è detta *onda piana equivalente alla riverberazione*.

Se si denota allora con $\varphi_r(\alpha, \beta)$ la funzione di direttività in ricezione normalizzata all'unità del trasduttore, supposto orientato in modo che sia $\varphi_r(0, 0) = 1$, la intensità acustica elementare del-

l'onda piana equivalente alla riverberazione prodotta dall'elemento di volume dV è evidentemente:

$$dJ_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^2} 10^{-\frac{2\alpha}{10}R} \frac{m}{4\pi} \varphi_r^2(\alpha, \beta) \varphi_r^2(\alpha, \beta) \cos \alpha \, d\alpha \, d\beta \, dR \quad 15-6$$

Per ottenere la intensità dell'onda piana equivalente alla riverberazione prodotta da tutto il mezzo circostante basta integrare la 15-6 entro tutto il volume coagente; si ha così:

$$J_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{m}{4\pi} \int_{R-\frac{c\tau}{4}}^{R+\frac{c\tau}{4}} \frac{1}{R^2} 10^{-\frac{2\alpha}{10}R} dR \int_0^{2\pi} d\beta \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \varphi_r^2(\alpha, \beta) \varphi_r^2(\alpha, \beta) \cos \alpha \, d\alpha \quad 15-7$$

Nelle normali applicazioni ecogoniometriche interessa calcolare il valore di J_r per distanze di almeno alcune centinaia di mt. dal trasduttore, mentre, d'altra parte, le durate di impulso sono generalmente comprese tra alcuni millesimi e poche decine di millesimi di secondo; si può dunque ritenere che il termine $\frac{1}{R^2} 10^{-\frac{2\alpha}{10}R}$, per R variabile tra $R - \frac{c\tau}{4}$ e $R + \frac{c\tau}{4}$, sia costante ed uguale al valore che il termine assume per il valore medio R dell'intervallo stesso. Se allora si pone:

$$G_{tr} = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} d\beta \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \varphi_r^2(\alpha, \beta) \varphi_r^2(\alpha, \beta) \cos \alpha \, d\alpha} \quad 15-8$$

la 15-7 può essere posta sotto la forma:

$$J_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^2} 10^{-\frac{2\alpha}{10}R} m \frac{c\tau}{2} \frac{1}{G_{tr}} \quad 15-9$$

La 15-9 fornisce il valore dell'intensità dell'onda piana equivalente alla riverberazione in funzione della distanza R , ma essendo, come si è detto, $R = \frac{ct}{2}$, la 15-9 esprime il valore della stessa intensità in funzione del tempo.

Il parametro G_{tr} definito dalla 15-8 è detto *guadagno di riverberazione di volume* o, più frequentemente, *guadagno in trasmissione-ricezione*; tanto più esso è elevato tanto più è piccolo il disturbo prodotto dalla riverberazione di volume; il parametro G_{tr} caratterizza dunque l'attitudine del trasduttore ricetrasmittente,

e quindi dell'impianto ecogoniometrico di cui è parte, a discriminare i segnali d'eco dal disturbo prodotto dalla riverberazione stessa.

In base alla 15-9 si potrà facilmente verificare che il guadagno in trasmissione-ricezione esprime il rapporto tra la intensità dell'onda piana equivalente al disturbo di riverberazione per un trasduttore adirezionale che irradia in tutte le direzioni ed all'unità di distanza un impulso di intensità $\frac{G_t W_o}{4\pi}$, uguale a quello che il trasduttore considerato irradia sull'asse all'unità di distanza, e la intensità dell'onda piana equivalente al disturbo di riverberazione per il trasduttore in esame. Tenendo presenti le definizioni e le espressioni formali dei guadagni di direttività in trasmissione ed in ricezione, quali risultano dalle 4-75 e 4-82, appare ancor più espressiva la denominazione di guadagno di direttività in trasmissione-ricezione attribuita al parametro G_{tr} di cui alla 15-6 ed ancor più evidenti le analogie concettuali e formali tra questo e quelli.

Si supponga ora che a distanza R e nella direzione $\alpha = \beta = 0$ sia ubicata una sorgente d'eco idealmente costituita da una superficie riflettente S di coefficiente di riflessione unitario e tale che la intera potenza da essa stessa riflessa sia uniformemente distribuita in tutto lo spazio circostante. La intensità acustica irradiata dall'impianto in esame nel punto di ubicazione dell'ipotetica sorgente d'eco ora definita è evidentemente:

$$I_t = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^2} 10^{-\frac{\alpha}{10} R} \quad 15-10$$

La intensità acustica dell'onda d'eco prodotta dalla superficie S nel punto di ubicazione del trasduttore ricetrasmittente, è quindi:

$$I_o = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^4} 10^{-\frac{2\alpha}{10} R} \frac{S}{4\pi} \quad 15-11$$

Dalle 15-9 e 15-11 discende che l'onda di riverberazione può pensarsi attribuibile ad una sorgente d'eco ideale, ubicata sull'asse ed a distanza R , avente superficie:

$$S_e = m \frac{c\tau}{2} \frac{4\pi R^2}{G_{tr}} \quad 15-12$$

Il guadagno di direttività in trasmissione-ricezione riduce dunque in misura proporzionale il volume coagente, che per un trasduttore adirezionale risulterebbe evidentemente $4\pi R^2 \frac{c\tau}{2}$.

Tenendo presente che G_{tr} è un numero puro e che il coefficiente m ha, come si è detto, la dimensione dell'inverso di una lunghezza, la 15-12 appare dimensionalmente omogenea.

Dalle 15-9 e 15-11 è possibile dedurre il rapporto tra la intensità del segnale d'eco prodotto dalla ipotetica superficie S ed il disturbo di riverberazione; esso è infatti:

$$\epsilon_v = \frac{S}{S_e} = \frac{S}{4\pi R^2 \frac{c\tau_o}{2} m} \frac{1}{G_{tr}} \quad 15-13$$

Dalle 15-9 e 15-13 si possono trarre alcune conclusioni interessanti dal punto di vista sia della strutturazione che della condotta di un impianto ecogoniometrico; e precisamente:

1. La intensità dell'onda piana equivalente al disturbo prodotto dalla riverberazione di volume è proporzionale alla intensità acustica, $\frac{G_t W_o}{4\pi}$, dell'impulso emesso dall'impianto stesso sull'asse ed all'unità di distanza; il rapporto segnale/disturbo però non dipende evidentemente da tale intensità in quanto ad essa risulta proporzionale anche il segnale d'eco. La adozione, tuttavia, di trasduttori ricetrasmittenti più direttivi migliora il rapporto segnale/disturbo in quanto ad essi corrispondono più elevati valori di G_{tr} e quindi minori valori del volume coagente o, se si vuole, della superficie equivalente alla riverberazione medesima.
2. L'intensità della riverberazione aumenta proporzionalmente alla durata dell'impulso in quanto proporzionalmente a questa aumentano il volume coagente e la superficie equivalente e per ciò, come risulta dalla 15-13, il rapporto segnale/disturbo è inversamente proporzionale a tale durata. Da quanto sopra consegue che in zone fortemente riverberanti l'adozione di tempi lunghi di emissione può risultare pregiudiziale per la discriminazione dell'eco.

3. L'intensità del disturbo prodotto dalla riverberazione varia, se si prescinde dall'assorbimento del mezzo, in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza, mentre nelle stesse condizioni, come si rileva dalla 15-11, l'intensità dell'eco prodotta dalla ipotetica superficie S varia in modo inversamente proporzionale alla quarta potenza della distanza stessa. Tale differente comportamento deriva dal fatto, rilevabile dalla 15-12, che la riverberazione è attribuibile ad una superficie equivalente che aumenta proporzionalmente al quadrato della distanza.
4. L'intensità della riverberazione cresce proporzionalmente, come era senz'altro prevedibile, al coefficiente m che caratterizza, come si è detto, le proprietà riverberanti del mezzo di propagazione.

La teoria elementare dianzi esposta si basa sulla ipotesi, esplicitamente posta, che il fenomeno della riverberazione di volume possa pensarsi determinato da una infinità di riflettori elementari uniformemente distribuiti nello spazio sottomarino. In realtà i rilievi sperimentali effettuati mostrano normalmente una notevole concentrazione delle sorgenti di riflessione entro un certo strato sito a profondità variabile da luogo a luogo e, per uno stesso luogo, a seconda dei giorni e delle ore del giorno.

Lo strato anzidetto (*deep scattering layer*) è occupato da una moltitudine di microorganismi marini detti *plancton* (dal greco $\pi\lambda\alpha\zeta\omega$: andare errando) che migrano ed occupano strati a profondità diverse nelle diverse ore del giorno e nei diversi periodi dell'anno.

Nella figura 15-2 sono riportati i livelli di riverberazione in funzione della profondità ottenuti da EYRING¹ come medie di molti rilievi; nella stessa figura il picco A è dovuto allo strato dei plancton, mentre il picco B al fondo. Il coefficiente m è risultato variare durante i molti rilievi eseguiti da 10^{-9} a 10^{-5} Yd^{-1} .

Nella foto di fig. 15-3 è riprodotto invece un ecogramma rilevato da M. FRASSETTO con uno scandaglio dell'OCEANOGRAPHER dotato di un elevato potere risolutivo; in essa sono visibili le tracce A e B prodotte rispettivamente dalla prima e dalla seconda eco dal fondo e, con eccezionale chiarezza, il *deep scattering layer*.

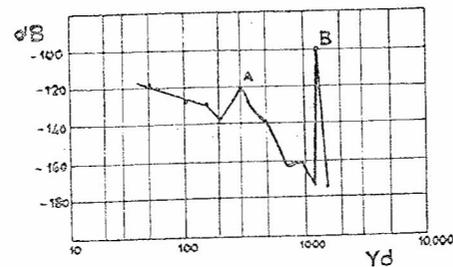


FIG. 15.2 - LIVELLI DELLA RIVERBERAZIONE DI VOLUME IN FUNZIONE DELLA PROFONDITA'.

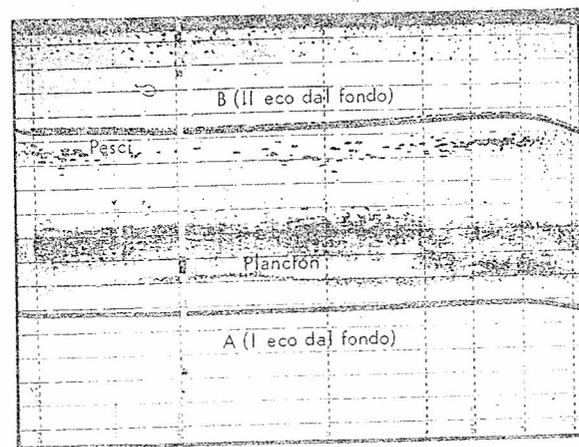


FIG. 15.3 - UN ECOGRAMMA CHE MOSTRA LO STRATO DI PLANCTON.

2. La riverberazione di fondo.

Il fondo marino non è evidentemente una superficie piana e speculare e pertanto se un raggio incide su di esso la sua intensità in parte penetra nel fondo stesso ed in parte si diffonde nello spazio sottomarino circostante. Le proprietà riverberanti di un fondo marino, relative ad una prefissata direzione, possono essere caratterizzate a mezzo di una costante che esprima il rapporto tra la intensità I_r^1 del raggio riflesso in quella direzione da un'area unitaria di quel fondo ed all'unità di distanza da essa e la in-

acustica generata dal trasduttore O in un punto giacente sul fondo a distanza R ed in direzione α , β è evidentemente:

$$I = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^2} 10^{-\frac{a}{10}R} \varphi_t^2(\alpha, \beta) \quad 15-17$$

La intensità acustica elementare dell'onda riflessa dalla area $dS = \frac{c\tau}{2} R d\beta$ del fondo, valutata a distanza R da essa, è evidentemente:

$$dJ_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^4} 10^{-\frac{2a}{10}R} \frac{m_f(\alpha)}{2\pi} \frac{c\tau}{2} R \varphi_t^2(\alpha, \beta) d\beta \quad 15-18$$

Come nel caso della riverberazione di volume, la intensità elementare dell'onda piana equivalente è dunque:

$$dJ_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^3} 10^{-\frac{2a}{10}R} \frac{m_f(\alpha)}{2\pi} \frac{c\tau}{2} \varphi_t^2(\alpha, \beta) \varphi_r^2(\alpha, \beta) d\beta \quad 15-19$$

Nella massima parte delle applicazioni la caratteristica di direttività verticale dei trasduttori ricetrasmittenti è compresa entro $\pm 10^\circ$ ed il coefficiente $m_f(\alpha)$ che compare nella 15-19 può perciò considerarsi costante ed indipendente da R; la intensità dell'onda piana equivalente alla riverberazione totale risulta dunque:

$$J_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^3} 10^{-\frac{2a}{10}R} \frac{m_f}{2\pi} \frac{c\tau}{2} \int_0^{2\pi} \varphi_t^2(\alpha, \beta) \varphi_r^2(\alpha, \beta) d\beta \quad 15-20$$

Se si introducono le ampiezze angolari α_o e β_o delle caratteristiche di direttività rispettivamente verticale ed orizzontale del trasduttore, sicchè si possa ritenere che sia: $\varphi_t(\alpha, \beta) = \varphi_r(\alpha, \beta) = 1$ per $|\alpha| \leq \frac{\alpha_o}{2}$, $|\beta| \leq \frac{\beta_o}{2}$ e $\varphi_t(\alpha, \beta) = \varphi_r(\alpha, \beta) = 0$ per $|\alpha| > \frac{\alpha_o}{2}$, $|\beta| > \frac{\beta_o}{2}$, la 15-20 può porsi sotto la forma:

$$J_r = \frac{G_t W_o}{4\pi} \frac{1}{R^3} 10^{-\frac{2a}{10}R} \frac{m_f}{2\pi} \frac{c\tau}{2} \beta_o \quad 15-21$$

Dalle 15-11 e 15-21 risulta che l'onda di riverberazione dal fondo può essere attribuita ad una superficie equivalente che, come

il fondo stesso, distribuisca in un semispazio la energia riflessa ed il cui valore è:

$$S_e = \frac{m_f}{2\pi} \frac{c\tau}{2} R \beta_o \quad 15-22$$

Le 15-11 e 15-22 consentono di dedurre il valore del rapporto tra la intensità del segnale d'eco prodotta dalla sorgente posta in direzione $\alpha = \beta = 0$ ed a distanza R ed il disturbo prodotto dalla riverberazione da fondo; esso è infatti:

$$\varepsilon_f = \frac{S}{S_e} = \frac{S}{\frac{m_f}{2\pi} \frac{c\tau}{2} R \beta_o} \quad 15-23$$

Da quanto è stato detto è possibile trarre alcune interessanti conclusioni:

1. Il disturbo prodotto dalla riverberazione dal fondo è proporzionale alla intensità acustica, $\frac{G_t W_o}{4\pi}$, dell'impulso emesso dall'impianto ecogoniometrico sull'asse ed all'unità di distanza; il rapporto segnale/disturbo non dipende però evidentemente da questa intensità. La adozione tuttavia di trasduttori ricetrasmittenti più direttivi migliora il rapporto segnale/disturbo; ad una maggiore direttività orizzontale corrisponde infatti una minore superficie equivalente e ad una maggiore direttività verticale corrisponde un maggior valore della distanza minima dell'area coagente dal trasduttore e quindi una minore intensità della riverberazione.
2. L'intensità della riverberazione aumenta proporzionalmente alla durata dell'impulso in quanto proporzionalmente aumenta la superficie equivalente; come risulta dalla 15-23, il rapporto segnale/disturbo varia in modo inversamente proporzionale a tale durata. Da quanto sopra consegue che con fondali fortemente riverberanti l'adozione di lunghe durate di emissione può risultare pregiudizievole per la discriminazione della eco.
3. L'intensità della riverberazione dal fondo, se si prescinde dall'assorbimento del mezzo, varia in modo inversamente proporzionale al cubo della distanza in quanto essa può essere at-

tribuita ad una sorgente d'eco la cui superficie, come risulta dalla 15-22, cresce proporzionalmente alla distanza stessa.

4. L'intensità della riverberazione dal fondo, come era senz'altro intuitivamente prevedibile, aumenta proporzionalmente al coefficiente di riflessione dal fondo.
5. La riverberazione dal fondo non ha il carattere di un'eco che si manifesti in corrispondenza di una determinata distanza ma piuttosto di un disturbo continuo; esso prima diminuisce al crescere della distanza perchè prevale l'attenuazione prodotta dai percorsi di andata e ritorno dell'onda, poi cresce e raggiunge un valore massimo perchè l'area coagente è vista sotto angoli cui corrispondono maggiori valori della caratteristica di direttività verticale e successivamente diminuisce perchè torna a prevalere l'effetto dovuto alla crescente distanza dell'area coagente dal trasduttore; a tale picco è appunto da attribuire il carattere di eco che spesso si riscontra nei fenomeni di riverberazione da fondo ascoltati a mezzo di un trasduttore con asse orizzontale.

In molti impianti ecogoniometrici specialmente destinati alla ricerca di oggetti giacenti sul fondo od in prossimità di esso l'asse del trasduttore viene inclinato verso il fondo. Quando l'angolo di inclinazione è molto elevato l'area coagente è delimitata, come si è detto, dalla caratteristica di direttività e risulta generalmente di forma ellittica.

I valori dei semiasse dell'elisse, come appare dalla fig. 15-5,

sono $R \frac{\text{sen } \frac{\alpha_0}{2}}{\text{sen}(\alpha - \frac{\alpha_0}{2})}$ e $R \text{sen } \frac{\beta_0}{2}$; l'area coagente è quindi in

questo caso:

$$S_c = \pi R^2 \frac{\text{sen } \frac{\alpha_0}{2} \text{sen } \frac{\beta_0}{2}}{\text{sen}(\alpha - \frac{\alpha_0}{2})} \quad 15-24$$

e la superficie equivalente risulta perciò:

$$S_e = \frac{m_f(\alpha)}{2} R^2 \frac{\text{sen}(\frac{\alpha_0}{2}) \text{sen}(\frac{\beta_0}{2})}{\text{sen}(\alpha - \frac{\alpha_0}{2})} \quad 15-25$$

Gli angoli α_0 e β_0 sono generalmente di pochi gradi e la 15-25 può quindi, in questo caso, porsi sotto la forma:

$$S_e = R^2 \frac{m_f(\alpha)}{8} \frac{\alpha_0 \beta_0}{\text{sen}(\alpha - \frac{\alpha_0}{2})} \quad 15-25a$$

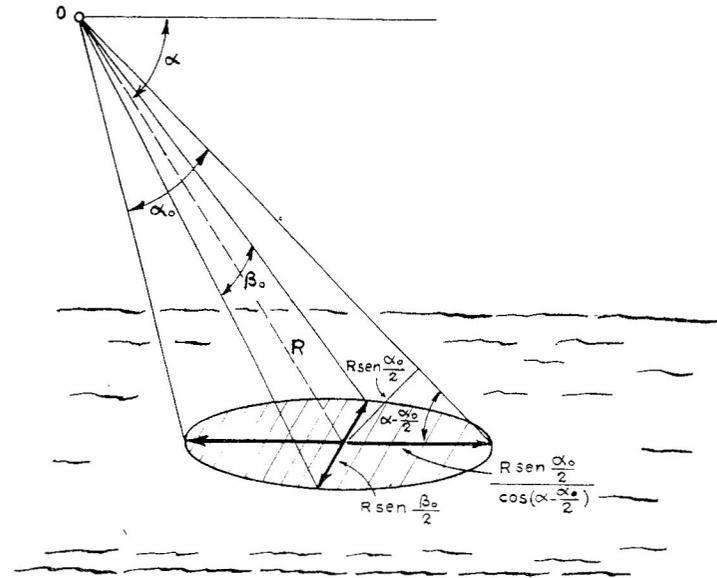


FIG. 15.5 - AREA COAGENTE CON ASSE DEL TRASDUTTORE MOLTO INCLINATO VERSO IL FONDO.

Se l'angolo α è prossimo a 90° si ha infine:

$$S_e = R^2 \frac{m_f(\alpha)}{8} \alpha_0 \beta_0 \quad 15-25b$$

In base alla 15-24, se l'area coagente è limitata dalle caratteristiche di direttività, la intensità acustica dell'onda piana equivalente alla riverberazione di fondo risulta:

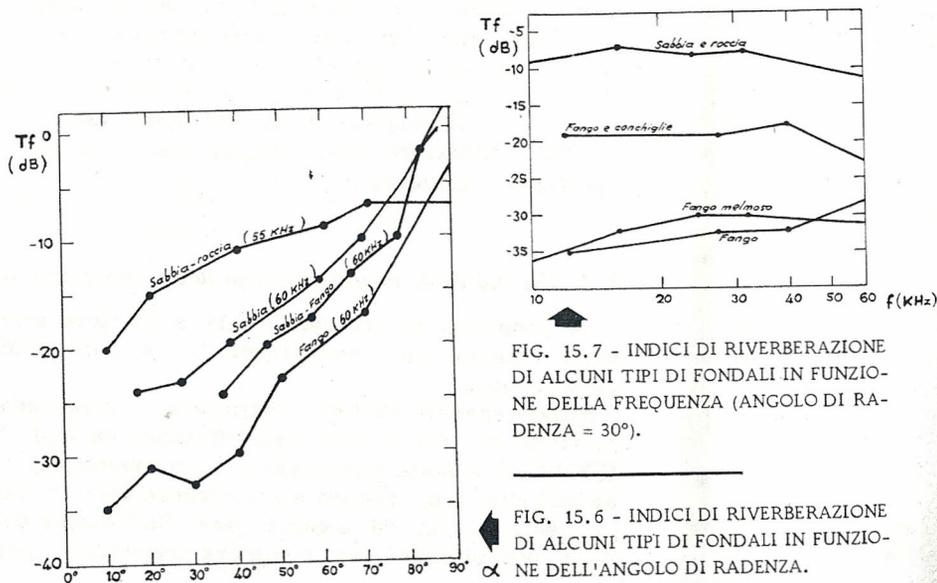
$$J_r = \frac{G_t W_0}{4\pi} \frac{1}{R^2} 10^{-\frac{2\alpha}{10}} R \frac{m_f(\alpha)}{2} \frac{\text{sen } \frac{\alpha_0}{2} \text{sen } \frac{\beta_0}{2}}{\text{sen}(\alpha - \frac{\alpha_0}{2})} \quad 15-26$$

Merita d'essere rilevato il fatto che nel caso in esame la intensità della riverberazione di fondo, prescindendo dalla attenuazione per assorbimento, varia in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza, perchè, come risulta dalla 15-24, l'area coagente cresce proporzionalmente al quadrato della distanza stessa. Per una completa definizione della legge di dipendenza della intensità della riverberazione dalla distanza occorre però tener presente che anche l'angolo di radenza α dipende dalla distanza e dalla quota del fondo rispetto alla quota alla quale il trasduttore è ubicato.

2.1. Gli indici di riverberazione del fondo (bottom reverberation, o bottom backscattering strength).

Le proprietà riverberanti dei fondi marini dipendono dalla natura del fondo, dall'angolo di radenza e dalla frequenza della onda incidente.

R. J. URICK² ha eseguito un ciclo di misure dei coefficienti di riverberazione del fondo con segnali impulsivi e per frequenze comprese tra 10 e 60 kHz. Nella fig. 15-6 sono riportati i valori del bottom reverberation strength, così come definito dalla 15-15,



in funzione dell'angolo di radenza per diversi tipi di fondale e per frequenze di 55 e 60 kHz, mentre nella fig. 15-7 sono riportati i valori degli stessi coefficienti in funzione della frequenza, per angolo di radenza di 30° e per gli stessi tipi di fondo.

Lo stesso R. J. URICK³ ha eseguito, a mezzo di onde prodotte da esplosioni, un ciclo di misure degli indici di riverberazione del fondo in tre aree diverse, di profondità variabile tra i 4000 e i 5000 m, i cui fondali erano probabilmente costituiti da fango o fango-melma con una coltre superficiale di materiali sedimentari. La dipendenza dell'indice di riverberazione dall'angolo di radenza è stata dedotta dalla legge di variazione in funzione del tempo dell'onda di riverberazione conseguente, mentre l'analisi spettrale dell'onda stessa ha consentito di ricavare i valori del bottom reverberation strength per alcune frequenze comprese tra 500 e 8000 Hz e per angolo di radenza di 30°; essi sono riportati nella fig. 15-8.

Nelle figg. 15-9 e 15-10 sono invece riportati i valori degli stessi coefficienti in funzione dell'angolo di radenza, valutati rispettivamente nelle bande 500 - 1000 Hz e 4000 - 8000 Hz.

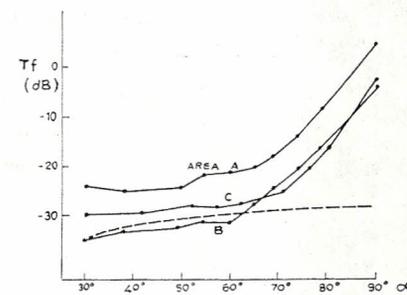
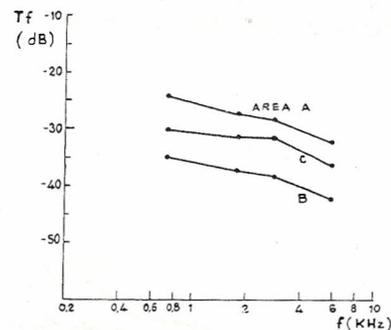


FIG. 15.8 - INDICI DI RIVERBERAZIONE DEL FONDO IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA IN TRE AREE A, B, C (ANGOLO DI RADENZA = 30°).

FIG. 15.9 - INDICI DI RIVERBERAZIONE DEL FONDO IN FUNZIONE DELL'ANGOLO DI RADENZA, NELLA BANDA A 500-1000 Hz.

Dalla figura 15-7 si ricava che per fondali *duri* gli indici di riverberazione sono indipendenti dalla frequenza, mentre per fondali *moll*i, nell'intervallo delle frequenze comprese tra 10 e 60 kHz, si rivelerebbe un aumento, peraltro di misura assai modesta, dei coefficienti stessi all'aumentare della frequenza; dalla fig. 15-8 si rileverebbe al contrario una diminuzione, anche questa di misura modesta, circa 2 dB per ottava, del bottom reverberation strength con la frequenza nella banda tra 500 e 8000 Hz; nella deduzione di questi ultimi non è stato tenuto conto però della differente attenuazione dell'acqua di mare alle diverse frequenze. Sembra quindi potersi ritenere che anche per i fondali molli i coefficienti di riverberazione siano praticamente indipendenti dalla frequenza, come appunto è stato rilevato da K. W. MACKENZIE⁴ sulla base di un ciclo di misure effettuato nella banda da 0,53 a 80 kHz. Secondo lo stesso MACKENZIE valori sufficientemente approssimati dei coefficienti di riverberazione del fondo con piccoli angoli di radenza possono essere calcolati con la relazione:

$$S = -28 + 10 \log \sin^2 \alpha \quad 15-27$$

essendo α l'angolo di radenza.

Nelle figg. 15-9 e 15-10 è stato riportato in tratteggio l'andamento del coefficiente di riverberazione in funzione dell'angolo

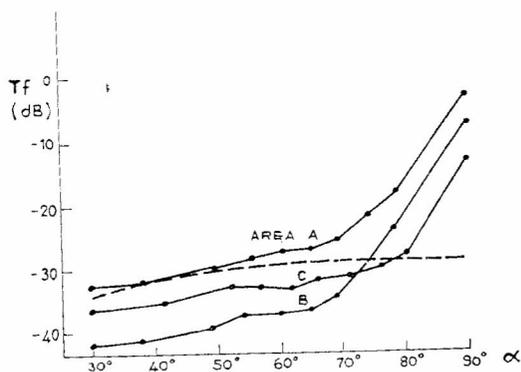


FIG. 15.10 - INDICI DI RIVERBERAZIONE DEL FONDO IN FUNZIONE DELL'ANGOLO DI RADENZA, NELLA BANDA 4000 - 8000 Hz.

di radenza secondo la legge di tipo seno-quadratico di cui alla 15-27, che sarebbe valida qualora la potenza captata dal fondo, che varia sinusoidalmente, fosse diffusa in tutte le direzioni con una variazione anche essa sinusoidale, come previsto dalla legge di Lambert. Orbene dall'esame dei diagrammi anzidetti risulta che la dipendenza seno-quadratica è verificata con buona approssimazione per angoli di radenza non maggiori di 70° - 75°, mentre per angoli di radenza prossimi a 90° gli indici di riverberazione effettivi risultano notevolmente maggiori; si può dunque supporre che per angoli di radenza molto elevati l'energia acustica venga prevalentemente riflessa dalle sfaccettature dei corpi giacenti sul fondo.

Dalla fig. 15-6, infine, si può rilevare che per piccoli angoli di radenza i fondali duri sono più riverberanti di quelli molli come è, in certo senso, intuitivo.

3. La riverberazione dalla superficie.

La trattazione fisico-geometrica della riverberazione da superficie è evidentemente del tutto simile a quella esposta nel precedente paragrafo 2 per la riverberazione dal fondo; tutti i risultati e le conclusioni ivi stabiliti sono quindi ugualmente validi per la riverberazione da superficie, quando si sostituisca all'indice di riverberazione del fondo una analoga grandezza detta appunto *indice di riverberazione della superficie (surface reverberation o surface backscattering strength)* e per la cui definizione è ancora ugualmente valida la 15-15.

3.1. Gli indici di riverberazione della superficie del mare.

Le proprietà riverberanti della superficie marina dipendono evidentemente dalla velocità del vento, dall'angolo di radenza e dalla frequenza.

Rilievi sperimentali del coefficiente di riverberazione della superficie del mare sono stati effettuati da R. J. URICK e R. M. HOOVER⁵ e nella figura 15-11 sono appunto riportati, in funzione dell'angolo di radenza e per diverse velocità del vento, i valori medi ricavati dalle esperienze. Dall'esame della figura stessa si può rilevare che, come era prevedibile, per piccoli valori

della velocità del vento. la superficie marina si comporta in modo prevalentemente speculare, mentre, per valori più elevati della stessa velocità, la potenza acustica dell'onda incidente viene diffusa nello spazio circostante.

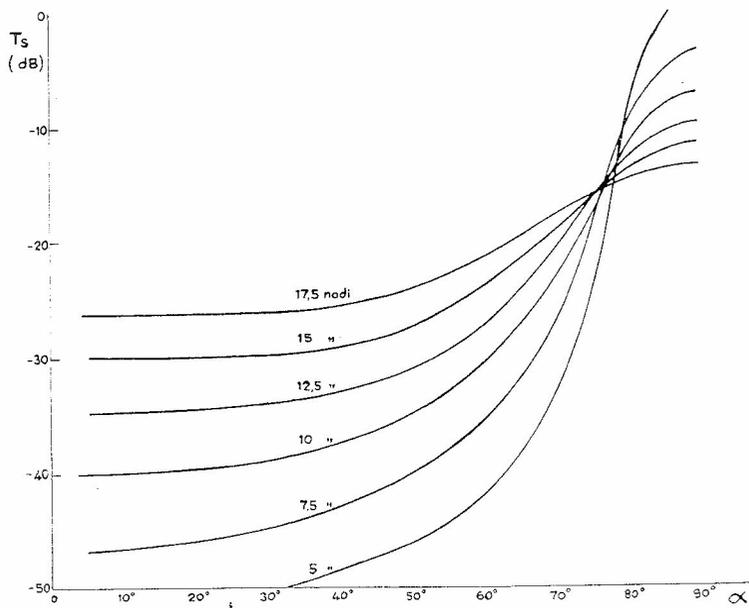


FIG. 15. 11 - INDICI DI RIVERBERAZIONE DELLA SUPERFICIE DEL MARE IN FUNZIONE DELL'ANGOLO DI RADENZA E PER DIVERSE VELOCITA' DEL VENTO.

R. M. RICHTER⁶ ha eseguito analoghi rilievi, in una zona di mare profonda circa 5000 m, a mezzo di onde acustiche prodotte da cariche esplosive. Anche in questo caso, come per la riverberazione dal fondo, la dipendenza dell'indice di riverberazione dall'angolo di radenza è stata dedotta dalla variazione in funzione del tempo della intensità dell'onda di riverberazione conseguente, mentre l'analisi spettrale dell'onda stessa ha consentito di ricavare i valori degli indici entro le larghezze di banda di un'ottava

in tutto l'intervallo di frequenze compreso tra 0,8 e 12,8 kHz.

Le misure hanno confermato che il potere riverberante della superficie marina, in tutto l'intervallo di frequenze esaminato, cresce al crescere sia della frequenza che dell'angolo di radenza per valori di quest'ultimo maggiori di 10°; il potere riverberante della superficie aumenta, al diminuire dell'angolo di radenza, per valori di quest'ultimo minori di 10° ed il fatto trova plausibile spiegazione nella esistenza di uno stato riverberante, attiguo alla superficie, occupato probabilmente da microorganismi marini.

Altri rilievi dei coefficienti di riverberazione della superficie mediante onde esplosive sono stati eseguiti da R. P. CHAPMAN e J. H. HARRIS⁷ nella banda 400 - 6400 Hz. Questi hanno dedotto una relazione teorico-empirica che consente di calcolare i valori dell'indice di riverberazione in funzione della frequenza, della velocità del vento e dell'angolo di radenza; essa è:

$$T_s = 3,3 \gamma \log \frac{\alpha}{30} - 42,4 \log \gamma + 26 \quad 15-28$$

in cui:

T_s è l'indice di riverberazione della superficie in dB

α è l'angolo di radenza

f è la frequenza in Hz

V è la velocità del vento in nodi

$$\gamma = 158 (Vf^{\frac{1}{3}})^{-0,58}$$

Anche negli spazi marini subglaciali si manifestano evidentemente fenomeni di riverberazione a causa delle ondulazioni degli strati glaciali superficiali.

Numerosi rilievi sono stati finora eseguiti allo scopo di misurare gli indici di riverberazione di superficie e prevederne il valore in base alle caratteristiche della rugosità della superficie glaciale⁸.

Per quanto ancora insufficienti per trarre delle conclusioni di carattere generale, le misure hanno mostrato una notevole variazione delle proprietà riverberanti delle superfici glaciali da luogo a luogo ed anche con le stagioni.

Nell'intervallo di frequenze da 3 a 10 kHz sono stati misurati valori dell'indice di riverberazione uguali a quelli che si riscontrano in mare con velocità del vento di circa 40 nodi!.